

第二十一章 复消色差透镜

21.1 绪论

三元复消色差透镜在第十九章扼要介绍过。复消色差透镜通过引入三颜色会聚于公共焦点(比如 F, d, C)降低了二级色差。单透镜的原色(primary color)的轴上点图是相当线性的。一个消色差透镜的二级色差图具有二次形式。在一个复消色差透镜中,三级色差的轴上点图在校正光谱上(corrected spectrum)趋于立方分布。这一章将展开讨论消色差透镜的原理。将介绍透镜光焦度(element powers)的行列式,接着将介绍在 ZEMAX 中插入起始半径的计算。本章将给出一个胶合消色差透镜的例子。

21.2 复消色差的约束条件。

在第 16.5.1 部分我们可以看到,一个薄的消色差透镜具有两个约束方程:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 &= \phi \\ \frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21.1)$$

另一方面,薄透镜组的消色差包含三个约束方程:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 &= \phi \\ \left(\frac{1}{v_1}\right)\phi_1 + \left(\frac{1}{v_2}\right)\phi_2 + \left(\frac{1}{v_3}\right)\phi_3 &= 0 \\ \left(\frac{P_1}{v_1}\right)\phi_1 + \left(\frac{P_2}{v_2}\right)\phi_2 + \left(\frac{P_3}{v_3}\right)\phi_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (21.2)$$

第一个是关于光焦度的约束方程。第二个约束方程是关于原色(primary color),第三是关于二级色差的。后者来源于第 19.3 节。图 21.1 为可见光谱区的近轴薄消色差透镜组。因为透镜组具有零厚度,因此,用一条垂直线表示。注意,在这个例子中, F, d, C 光被会聚于公共焦点。

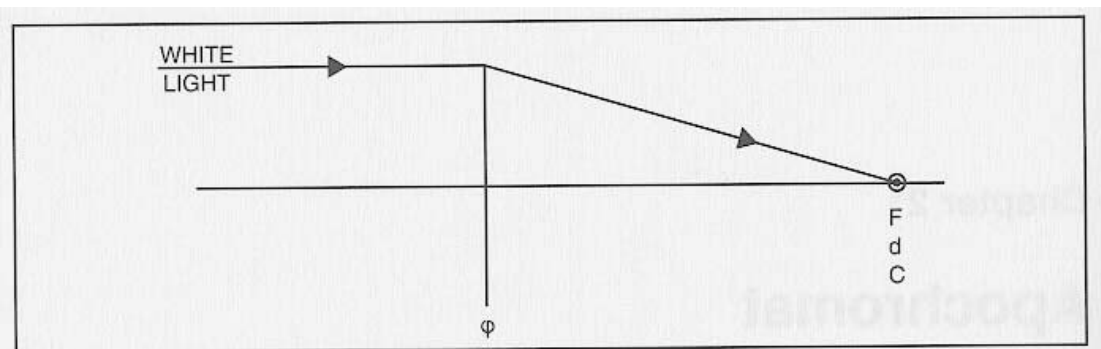


Fig. 21.1 Paraxial thin lens apochromat.

21.3 消色差透镜光焦度的解决方案

在方程组 21.2 中的约束条件包含三个方程和三个未知数。有足够的信息解出这些元件的光焦度。对行列式进行代数运算，就可以解出方程。我们开始找出方程组的行列式，如式子 (21.2) 所示。

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{v_1} & \frac{1}{v_2} & \frac{1}{v_3} \\ \frac{P_1}{v_1} & \frac{P_2}{v_2} & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.3)$$

展开得：

$$D = \left(\frac{P_3}{v_2 v_3} - \frac{P_2}{v_3 v_2} \right) - \left(\frac{P_3}{v_1 v_3} - \frac{P_1}{v_3 v_1} \right) + \left(\frac{P_2}{v_1 v_2} - \frac{P_1}{v_2 v_1} \right)$$

$$D = \frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} + \frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} + \frac{\Delta P_{21}}{v_1 v_2} \quad (21.4)$$

于是，存在三个行列式。第一个是：

$$D_1 = \begin{vmatrix} \phi & 1 & 1 \\ 0 & \frac{1}{v_2} & \frac{1}{v_3} \\ 0 & \frac{P_2}{v_2} & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.5)$$

可以化简为：

$$D_1 = \left[\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} \right] \phi \quad (21.6)$$

第二个行列式是：

$$D_2 = \begin{vmatrix} 1 & \phi & 1 \\ \frac{1}{v_1} & 0 & \frac{1}{v_3} \\ \frac{P_1}{v_1} & 0 & \frac{P_3}{v_3} \end{vmatrix} \quad (21.7)$$

即：

$$D_2 = \left[\frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} \right] \phi \quad (21.8)$$

最后一个行列式是：

$$D_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \phi \\ \frac{1}{v_1} & \frac{1}{v_2} & 0 \\ \frac{P_1}{v_1} & \frac{P_2}{v_2} & 0 \end{vmatrix} \quad (21.9)$$

即：

$$D_3 = \left[\frac{\Delta P_{21}}{v_2 v_1} \right] \phi \quad (21.10)$$

得到第一个元件得光焦度 ϕ_1 为：

$$\phi_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{\left[\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} \right] \phi}{\frac{\Delta P_{32}}{v_2 v_3} + \frac{\Delta P_{13}}{v_1 v_3} + \frac{\Delta P_{21}}{v_1 v_2}} \quad (21.11)$$

$$\phi_1 = \frac{\Delta P_{32} \phi}{\Delta P_{32} + \frac{\Delta P_{13} v_2}{v_1} + \frac{\Delta P_{21} v_3}{v_1}} \quad (21.12)$$

分子分母同乘于 v_1 ， ϕ_1 变成：

$$\phi_1 = \frac{v_1 \Delta P_{32} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.13)$$

同理得到 ϕ_2 和 ϕ_3 ：

$$\phi_2 = \frac{v_2 \Delta P_{13} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.14)$$

$$\phi_3 = \frac{v_3 \Delta P_{21} \phi}{v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21}} \quad (21.15)$$

21.4 计算例子

我们计算一个薄透镜组得光焦度，有效焦距(EFL)为 400mm 的胶合消色差透镜，用到的玻璃（及其性质）如表 21.2 所示。 ΔP_{ij} 如表 21.2 所示。

	Vendor	Glass	v_d	P_{dc}	n_d
1)	Schott	SSKN5	50.88	0.302094	1.658477
2)	Ohara	FPL53	94.97	0.308158	1.438763
3)	Schott	BAK1	57.55	0.304724	1.572529

ΔP_{32}	-0.003434
ΔP_{13}	-0.002630
ΔP_{21}	+0.006064

代入表中的数值，等式 21.13 中的分母为：

$$v_1 \Delta P_{32} + v_2 \Delta P_{13} + v_3 \Delta P_{21} = -0.174722 - 0.249771 + 0.348983 = -0.07551$$

代入方程 21.13:

$$\phi_1 = \frac{v_1 \Delta P_{32} \phi}{-0.07551} = \frac{-0.0004368}{-0.07551}$$

因此:

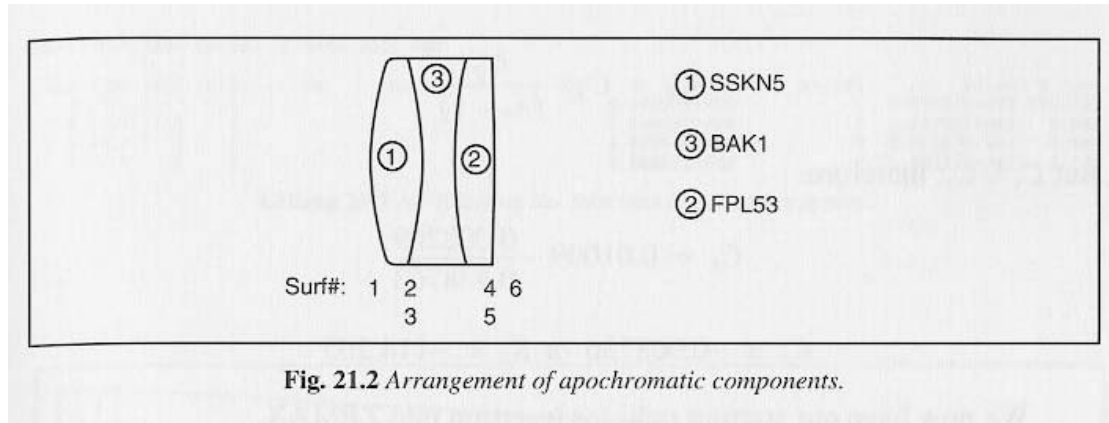
$$\phi_1 = 0.005785 \text{ or } f_1 = 172.869 \text{ mm}$$

同理，由方程组 21.14 和 21.15 可得:

$$\phi_2 = 0.008269 \text{ or } f_2 = 120.927 \text{ mm}$$

$$\phi_3 = -0.011554 \text{ or } f_3 = -86.548 \text{ mm}$$

(注意三个光焦度的总和等于 0.0025。)



现在，已经找出三个元件的光焦度，接下来，我们需要确定这些透镜的开始曲率。既然色差校正不依赖于元件的位置次序，那么，我们将把负透镜夹在两个正透镜中间，如图 21.2 所示。同时，我们让这一负透镜等凹度。

$$\phi_3 = (n_3 - 1)(C_3 - C_4), \quad \text{其中,} \quad C_4 = -C_3,$$

$$\phi_3 = 2C_3(n_3 - 1)$$

$$C_3 = \frac{-0.11554}{(2)(0.572529)}$$

$$C_3 = -0.01009 \text{ or } R_3 = -R_4 = -99.105 \text{ mm}$$

接下来，我们要求解第一个面的半径。

$$\phi_1 = (n_1 - 1)(C_1 - C_2) \quad \text{其中,} \quad C_2 = C_3,$$

$$C_1 = \frac{\phi_1}{n_1 - 1} + C_2$$

$$C_1 = \frac{0.005785}{0.658477} - 0.01009$$

$$C_1 = -0.001304 \text{ or } R_1 = -766.533 \text{ mm}$$

最后一步是找出最后一个面的光焦度。

$$\phi_2 = (n_2 - 1)(C_5 - C_6)$$

$$C_6 = C_5 - \frac{\phi_2}{(n_2 - 1)}$$

由于 $C_5 = C_4$ ，因此：

$$C_6 = 0.01009 - \frac{0.008269}{0.438763}$$

$$C_6 = -0.008756 \text{ or } R_6 = -114.205$$

此时，我们在 ZEMAX 中插入的起始半径。

21.5 ZEMAX 优化

现在准备开始在 ZEMAX 中优化校正色差。首先，插入在 21.4 节中计算出来的半径以及选定的玻璃(在 F, d, C 光谱上)。为了检查以上计算的焦距，我将让这些透镜具有零厚度。但是，我将在透镜间引入微小空气间隙(0.001mm)。记住，在 21.4 节设计的胶合消色差透镜属于薄透镜(零厚度)，透镜两边都存在空气间隙。在 MFE 中，我使用 EFLY 三次——每次对一个透镜。这将给我每个透镜的焦距。列表 21.1 是 MFE 的计算结果。这里的焦距与 21.4 节的计算本质上是一样的。

现在，我们给透镜组加入实际厚度(比如说分别是 10mm, 5mm, 10mm)。设计图如图 21.3 所示。轴向色差如图 21.4 所示。我们可以看到，厚度的增加消除色差校正。

遗憾的是，操作数 AXCL 不能帮助我们校正这些透镜地色差。设计操作数使得两种色具有公共的后焦距。我们需要使得 F, d 和 C 具有相同的焦距。怎样才能达到呢？其中的一个校正办法是，通过操作数 PARR 和 DIFF 达到。MFE 的这种运用如表 21.2 所示。在我们的例子中，PARR 是用来确定在像平面上，不同比率的光线的傍轴径向光高(paraxial radial ray

height)。我们必须确定光瞳内的一些径向光高，使得系统工作。我使用 $\rho_y = 0.1$ 。像平面是 Surf.No.7。PARR 在两对之间使用，每两种颜色一对。注意，没有分配权重。操作数 DIFF 用在每一个 PARR 对上。目标是零，权重是 1。变量在半径上，如优化前的表 21.3 所示。

优化操作以后，色差校正如图 21.5 所示。曲线在光谱区是三次方的。注意到曲线确实通过 F, d, C 光谱点。同时，注意到三级光谱(tertiary spectrum)在 4 微米处达到最大，而 400mm 有效焦距的胶合消色差透镜的二级光谱在 203 微米处是峰值(在第 18.3 节讨论)。

我们这里的唯一目标是展示三个消色差透镜的色差校正思路。这些透镜需要优化球差和慧差(如果一个是一个有限场的话)。能否应用透镜配曲调整(lens bending)降低这些像差主要取决于玻璃的选择。一些玻璃的选择可能证明有限极值，直到涉及曲率，尽管已经达到二级色差校正。

当在复消色差透镜(或者消色差透镜)中已经完成色差校正，对于三种颜色，后焦距相同，不是有效焦距。在以上消色差透镜例子中，对于 F, d, C 的 EFL 分别是 399.9250, 400 和 400.0343mm。

对于复消色差透镜，玻璃的选择比消色差透镜更为严格。错误的选择将导致某些曲面的过度曲率(excessive curvatures)。更加精确的曲率意味着更大的入射角，后者也产生更多的色散(尤其在高阶)。它包含了部分色散玻璃图(第 18.2 节)。经验法则如下：消色差透镜

的两个玻璃可以位于(或者接近)“标准玻璃线”,但是第三个必须远离“标准玻璃线”。(从标准玻璃线选择的两个玻璃可以认为是单一的人造玻璃,它们的部分色散与选择的第三个外来玻璃匹配。)用直线连接三个玻璃形成三角区。在例子中使用的玻璃如图 21.6 所示。这一法则标明最大化三角区域将导致总体更成功的设计。

Merit Function Value: 6.84452331E-002

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	% Cont
1	EFFL		2					4.00000E+002	1	3.99932E+002	100.000
2	EFLY	1	2					0.00000E+000	0	1.72855E+002	0.000
3	EFLY	3	4					0.00000E+000	0	-8.65502E+001	0.000
4	EFLY	5	6					0.00000E+000	0	1.20932E+002	0.000

Listing 21.1 MFE listing the thin lens apochromat system.

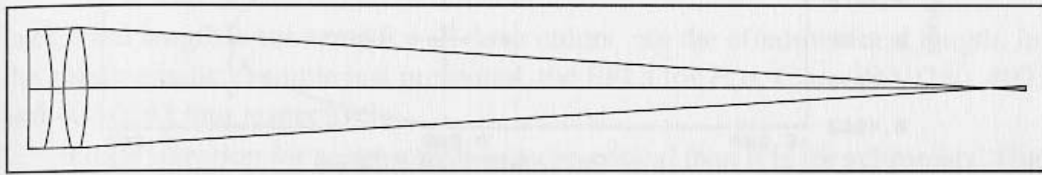


Fig. 21.3 Preliminary apochromatic design after insertion of glass thicknesses.

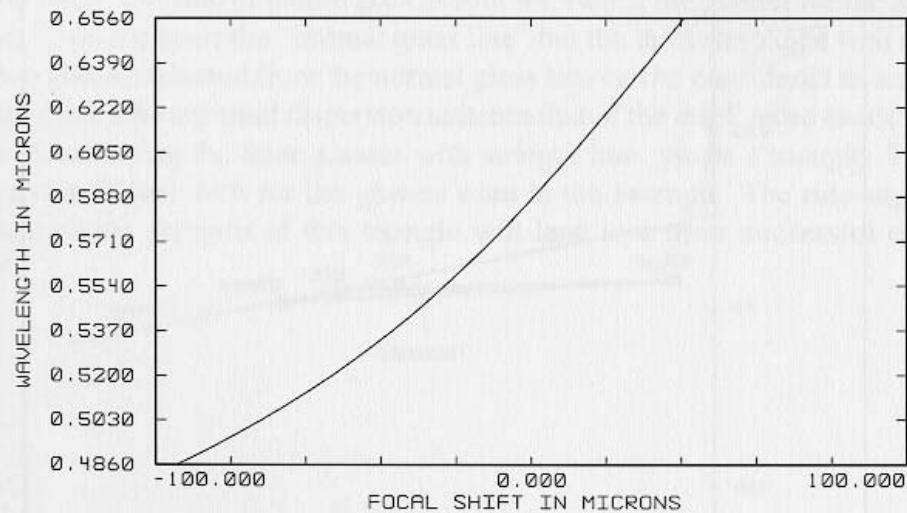


Fig. 21.4 Axial color of preliminary design.

Merit Function Value: 4.84862372E+000

Num	Type	Int1	Int2	Hx	Hy	Px	Py	Target	Weight	Value	% Cont
1	EFFL		2					4.00000E+002	1	3.91602E+002	100.000
2	EFLY	1	2					0.00000E+000	0	1.71832E+002	0.000
3	EFLY	3	4					0.00000E+000	0	-8.57625E+001	0.000
4	EFLY	5	6					0.00000E+000	0	1.22686E+002	0.000
5	PARR	7	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	6.02708E-004	0.000
6	PARR	7	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	8.08178E-016	0.000
7	DIFF	6	5					0.00000E+000	1	-6.02708E-004	0.000
8	PARR	7	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	8.08178E-016	0.000
9	PARR	7	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.00000E+000	0	2.60646E-004	0.000
10	DIFF	9	8					0.00000E+000	1	2.60646E-004	0.000
11											

Listing 21.2 MFE listing for three color correction.

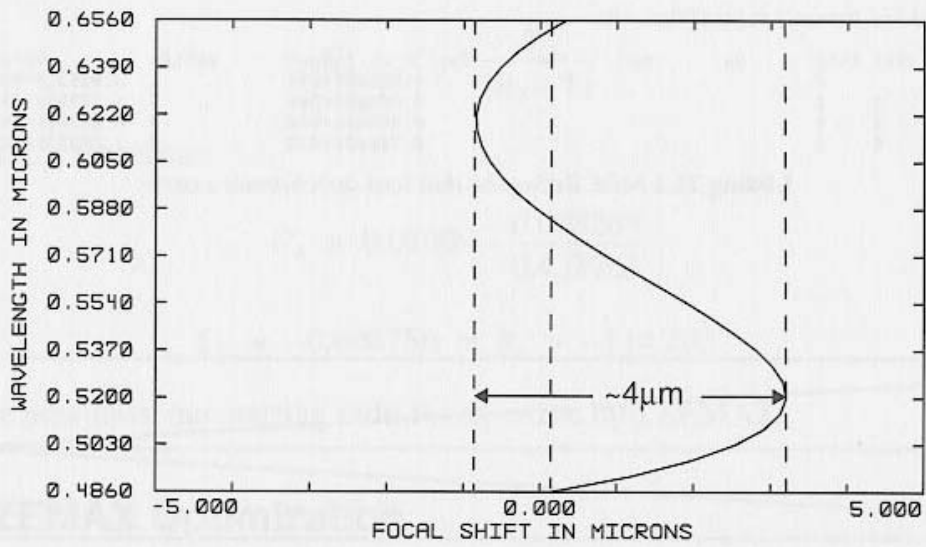


Fig. 21.5 Apochromatic correction for example system.

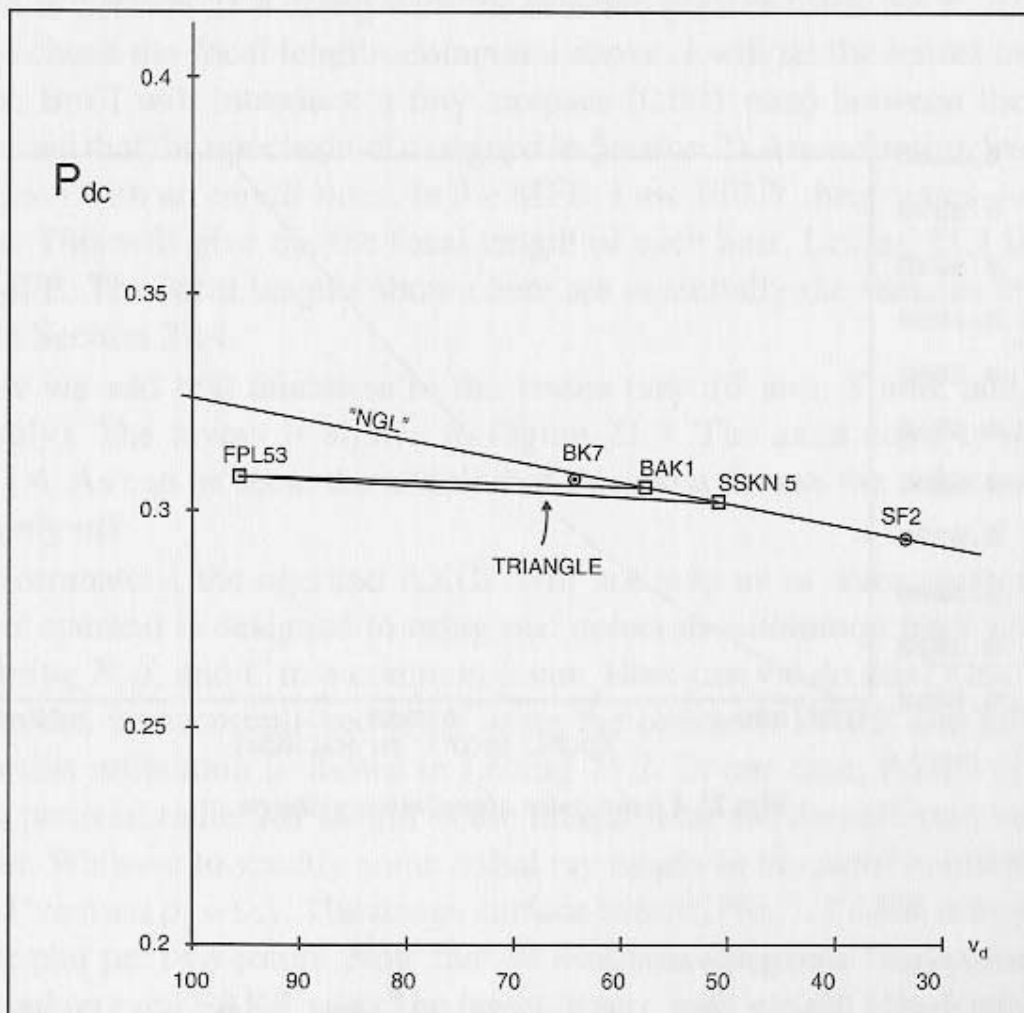


Fig. 21.6 Triangle on partial dispersion plot for glasses used in example.

SURFACE DATA SUMMARY:

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	STANDARD		Infinity	Infinity		0	0
STO	STANDARD		-766.533	10	SSKN5	50	0
2	STANDARD		-99.105	0.001		50.18751	0
3	STANDARD		-99.105	5	BAK1	50.18718	0
4	STANDARD		99.105	0.001		50.17223	0
5	STANDARD		99.105	10	FPL53	50.17255	0
6	STANDARD		-114.2052	397.2723		50.36112	0
IMA	STANDARD		Infinity			2.121979	0

Listing 21.3